



钢筋混凝土桁架拱桥加固后承载力 评定及拱脚裂缝分析

冯 冲¹, 崔文林², 王文雅², 刘子玉³

(1. 青岛市交通规划设计院有限公司, 山东 青岛 266000; 2. 青岛市市政工程设计
研究院有限责任公司, 山东 青岛 266000; 3. 石家庄铁道大学, 河北 石家庄 050000)

摘要:为研究加固后钢筋混凝土桁架拱桥承载力及拱脚裂缝,文章以某上承式钢筋混凝土桁架拱桥为研究背景,通过外观质量检测,识别病害类型及产生位置,分析病害成因;建立全桥有限元模型,提出采用黏贴钢板的方案加固横向联系构件,采用外包钢板结合低收缩自密实微膨胀混凝土的增大截面法加固主拱结构;针对多杆交汇、应力状态复杂且裂缝开展严重的拱脚区域,建立精细化局部有限元模型,系统分析了加固前后拱脚位置的应力状态、裂缝开展特征等参数。研究表明:加固后,桥梁结构承载能力显著提升并满足规范要求,拱脚裂缝宽度得到有效控制且分布范围明显减小。该加固方案取得了显著的工程效果和经济性,可为类似工程加固设计提供理论支持和指导。

关键词:桁架拱桥; 裂缝; 加固方式; 加固效果

中图分类号: TU398.7

文献标志码: A

文章编号: 1673-8993(2026)01-0063-09

doi: 10.13402/j.gcjs.2026.01.009

Evaluation of bearing capacity and analysis of arch foot cracks in reinforced concrete truss arch bridge by strengthened

FENG Chong¹, CUI Wenlin², WANG Wenya², LIU Ziyu³

(1. Qingdao Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China;
2. Qingdao Municipal Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Qingdao 266000, Shandong, China;
3. Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050000, Hebei, China)

Abstract: To study the bearing capacity and arch foot cracks of reinforced concrete truss arch bridges, taking a certain top supported reinforced concrete truss arch bridge as the research background. By conducting a visual quality inspection, the types and locations of defects are identified, the causes are analyzed. A finite element model of the entire bridge is established, a scheme of reinforcing the transverse connecting components by pasting steel plates is proposed, and the main arch structure is strengthened by using an increased section method of external steel plates combined with low shrinkage self-compacting micro expansion concrete; A refined local finite element model is established for the arch foot area with multiple intersecting bars, complex stress states, and severe crack propagation. The stress state and crack propagation characteristics of the arch foot position before and after reinforcement are systematically analyzed. Research has shown that after reinforcement, the load-bearing capacity of the bridge structure is significantly improved and meets the requirements of the specifications. The width of arch foot cracks is effectively controlled and the distribution range is significantly

收稿日期: 2024-11-04

基金项目: 2024年研究生创新资助项目(YC202404)

作者简介: 冯 冲(1991—),男,工程师,从事桥梁设计及加固方面的研究。

通信作者: 王文雅(1992—),女,工程师,从事路桥设计及健康监测研究。

reduced. The reinforcement scheme has achieved significant engineering results and economic viability, and the research findings can provide theoretical support and guidance for similar projects.

Key words: truss arch bridge; crack; reinforcement method; reinforcement effects

桁架拱桥兼有拱和桁架两种结构受力体系的优点,且具有受力明确、自重轻、经济指标优等特点被广泛推广建造^[1-3]。由于社会经济的不断发展,桁架拱桥服役期间内,行车密度和重载车辆的不断增加,导致桁架拱桥出现严重的病害,不能满足结构使用功能的要求^[4]。因此,桁架拱桥加固成为了当前桥梁工程领域的一个重要研究方向。罗钧等^[5]通过现场检测和调查,提出了基于有限元模型的混凝土结构裂缝成因分析新方法,确定裂缝产生的主要原因;丁鹏等^[6]、陈磊等^[7]提出采用 UHPC 套箍加固肋拱桥,加固后桥梁承载力明显提升、安全储备充足;戴许海等^[8]通过对加固后的桁架拱桥进行静载、动载试验,评价了桥梁的实际承载性能。

然而,大多数学者提出的加固方案主要针对整体结构,无法满足不同类型和不同病害的结构构件加固需求。基于广大学者的研究成果,本文主要研究桁架拱桥结构体系的关键构件加固技术,系统分析不同构件的病害机理,提出针对性的加固方案,采用有限元方法对加固方案进行仿真验证。研究成果将为桁架拱桥的加固改造提供科学的理论依据和技术指导,有效提升桥梁结构的服役性能,确保交通运输基础设施的安全运营和长期经济效益。

1 研究背景

以某上承式钢筋混凝土桁架拱桥项目为研究背景,桥长度为 53 m。桥梁结构体系组成:4 片横向间距 1.9 m 的桁架拱肋构成主拱,矢跨比为

0.11,桥面宽度净尺寸为 6.9 m。本桥为预制拼装斜拉杆式桁架拱桥,桥梁立面如图 1 所示。

现状钢筋混凝土桁架拱桥的主要构件尺寸:主拱肋截面高度为 0.55 m,宽度为 0.25 m;竖向支撑截面高度为 0.4 m,宽度为 0.25 m;斜向支撑截面高度为 0.25 m,宽度为 0.25 m;桁架拱肋间的横向联系截面高度为 0.25 m,宽度为 0.15 m。支撑之间的距离为 3.0~4.5 m 不等。现状桥梁建成年代早,运行时间长,原设计荷载等级:汽-15 级。

2 既有桥梁检测评估

2.1 桥梁病害

桥头位置的桥面板及混凝土铺装层破损严重,破损面积达到 0.3 m²,形成大面积空洞。桥面铺装存在多条纵向裂缝及不规则网裂,最大裂缝长度达 14 m;混凝土表面骨料外露、松散情况严重;台帽与桥面板搭接处存在横向长度 4 m,顺桥向最大尺寸 1.0 m 的空洞;桥面护栏多处缺损,且局部有外倾现象,混凝土表面风化严重(图 2)。

主拱肋底面、侧面、横向联系底部横梁及中部斜撑顶面有多处混凝土钢筋锈胀,导致露筋,每处面积为 0.05~0.1 m²,最大长度的锈胀裂缝达 2 m;横向联系裂缝病害问题严重(图 3),包括:底部横梁自底部延伸至顶面的斜向 U 型裂缝,底部裂缝最大宽度为 1.0 mm,侧面裂缝最大宽度为 0.50 mm;横梁左端宽度为 3.0 mm 的斜向贯通裂缝;缝长度为 0.4 m,宽度为 0.4 mm,自侧面延伸至顶面的裂缝等等。

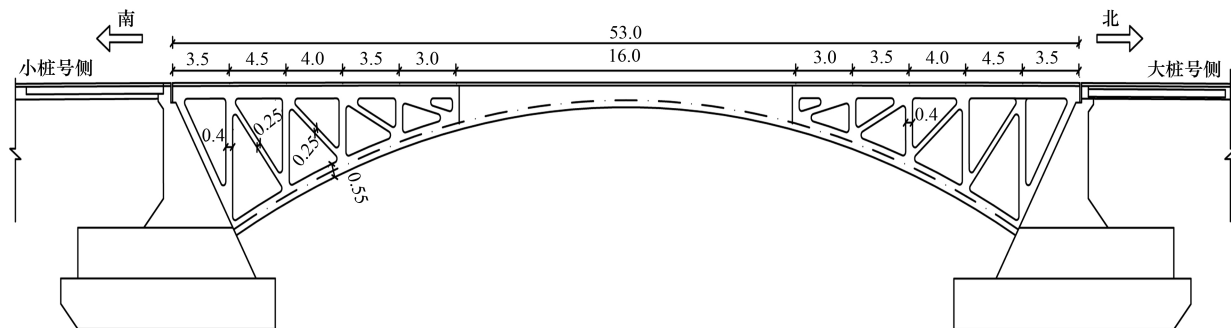
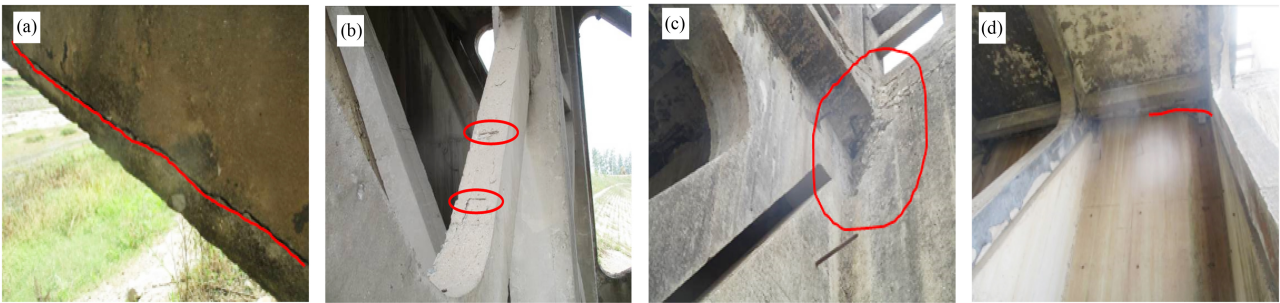


图 1 桥梁立面图



(a) 桥面纵向裂缝；(b) 桥面铺装破损；(c) 桥面护栏缺损

图 2 桥面系病害



(a) 主拱肋锈胀裂缝；(b) 主拱横向联系锈胀露筋；(c) 台帽混凝土破损；(d) 台帽混凝土开裂

图 3 上部结构及下部结构病害

大桩号端桥台侧墙存在长度为 1.8 m,宽 1.2 mm 自上而下的裂缝；小桩号端台帽左侧混凝土破损；大桩号端台帽混凝土开裂等病害。

2.2 桥梁技术状况评定

通过现场表观检查并结合仪器检测结果，对桁架拱桥病害进行系统的分析整理，进而对桥梁技术状况评定，桥梁技术状况评定结果如表 1 所示。

桥梁技术状况评定采用分层综合评定与单项

指标控制相结合的方法。本桥共有 11 个部件参与评定，其中：上部主要承重构件评定等级为 2 类，上部一般承重构件评定等级为 4 类，桥台及基础评定等级为 3 类，桥面铺装评定等级为 4 类，综合评定等级为 4 类桥梁，桥梁损伤严重，影响桥梁使用功能，依据桥涵养护要求及桥梁病害现状，应对本桥进行修复养护、加固及交通管制以保证功能需求。

表 1 桥梁技术状况评定结果

序号	评价部件	部件评定标度	部件评定等级	桥梁综合评定状况	技术状况等级
1	桥面铺装	4	4 类	52.6	4 类
2	栏杆、护栏	3	3 类		
3	锥坡、护坡	1	1 类		
4	翼墙、耳墙	1	1 类		
5	桥头与路堤连接部	1	1 类		
6	排水设施	3	3 类		
7	上部一般承重构件	4	4 类		
8	上部主要承重构件	2	2 类		
9	桥台及基础	3	3 类		
10	基础冲刷	1	1 类		
11	其他	2	2 类		

3 加固方式及承载力分析

3.1 加固方式研究

桁架拱桥的加固方式^[9-11]一般从两个方面进行考虑: 1) 从内因的角度出发: ①减小原桥自重, 包括拆除拱上结构、拆除桥面系等方式, 降低主拱内力, ②改变原桥受力体系, 包括释能法、梁拱共同受力等方法; 2) 从外因的角度出发, 采用轻质高强材料增加截面。

采用体外预应力加固方式对现状结构损伤较小、自重增加少, 对现状桥梁净空和路面高程无影响, 但高应力状态的预应力筋防腐要求和养护严格, 适用于抗弯、抗剪承载力不足和对桥梁净空有限制要求的情况; 黏贴钢板或纤维复合材料, 对原构件尺寸改变较小, 有效提高结构强度, 有效封闭裂缝、限制裂缝发展, 适用于加固受拉承载力不足或裂缝开展严重的构件, 具有快捷、方便的特点, 但对黏结剂和施工质量要求较高; 通过外包混凝土增加截面面积, 可有效提高结构强度、刚度及稳定性, 一般用于下弦杆加固, 该方式施工较复杂, 工期长, 截面尺寸和恒载增加较大, 对桥梁净空、交通通行影响较大。

通过分析各种加固方式的优缺点, 结合现状桥梁病害的情况, 本桥加固方案采用简便有效的黏贴钢板方法, 构件尺寸基本不改变, 恒载略有增加, 同时可有效提高桥梁原构件承载力, 限制裂缝的进一步发展。

钢筋混凝土桁架拱桥加固方案: 1) 拆除现状桥面板, 新建 C40 普通钢筋混凝土桥面板, 重新铺设防水层, 涂刷混凝土界面剂以确保钢筋混

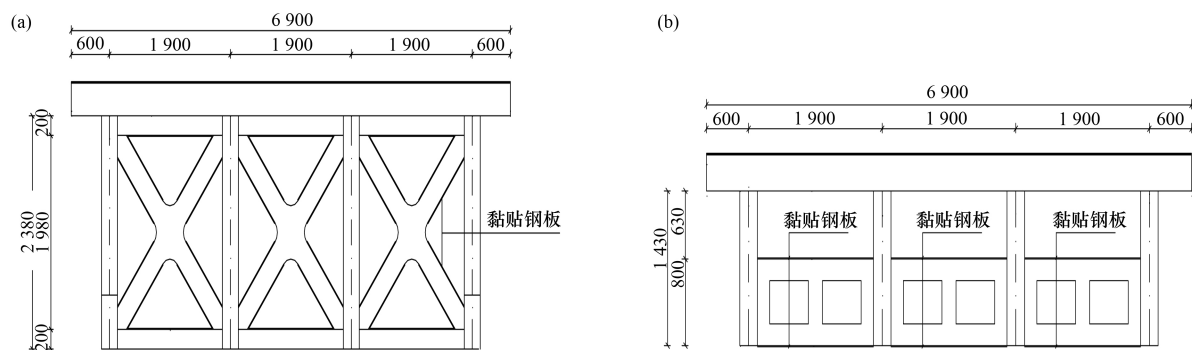
土铺装与现状梁板之间新旧混凝土衔接质量; 2) 拆除现状护栏, 新建防撞等级为 SB 级的护栏; 3) 采用环氧砂浆对结构混凝土脱落、露筋、锈胀等位置进行修补; 4) 采用灌浆工艺对现状裂缝进行封缝处理; 5) 对主拱结构采用外包钢板并浇筑微膨胀自密实低收缩混凝土的增大截面法; 6) 新设 4 处剪刀撑连接横向联系梁; 7) 横向联系及竖向支撑采用高强砂浆找平, 黏贴钢板的方式加固。加固钢板型号采用 355C, 板厚 6 mm, 与混凝土构件采用 M-16 螺栓连接。典型加固截面示意如图 4 所示。

3.2 加固前后承载力对比分析

钢筋混凝土桁架拱桥为多次超静定结构, 该结构体系包含了拱和桁架结构的双重受力特性, 主要承重构件是轴向受压为主的主拱拱片。采用有限元分析软件 Midas 建立全桥模型, 车道荷载按照公路-II 级进行加载。

在恒载、车道、温度等荷载组合作用下, 钢筋混凝土桁架拱桥主拱肋、竖向支撑、横向联系下横梁、横向联系剪刀支撑、斜向支撑等结构加固前后弯矩和轴力如表 2 所示。

根据表 2 可知: 加固前主拱在恒载作用下除拱顶部分截面承受拉力外, 其余截面均承受压力, 并且拱脚处的轴压力最大 3 322.27 kN, 拱顶的弯矩较大, 为 335.29 kN·m, 产生受弯裂缝; 主拱片间横向联系的下横梁在恒载、车道荷载等荷载作用下会产生拉力, 从而导致受拉的竖向裂缝; 斜向支撑在恒载作用下以受拉为主, 最大轴压拉力为 175.71 kN, 在荷载基本组合作用下, 斜杆最大轴拉力为 866.89 kN, 斜杆产生受拉的裂缝。加固



(a) 沿 3[#]、13[#]竖撑处; (b) 沿 4[#]、12[#]竖撑处

图 4 加固断面图

mm

表 2 加固前后各构件受力

构件名称	荷载组合	弯矩/(kN·m)				轴力/kN			
		最大值 (原桥)	最小值 (原桥)	最大值 (加固后)	最小值 (加固后)	最大值 (原桥)	最小值 (原桥)	最大值 (加固后)	最小值 (加固后)
主拱肋	恒载	70.71	-58.23	163.19	-112.30	-1 598.44	68.28	-2 259.18	-479.10
	车道荷载	264.88	-191.13	493.20	-258.06	-1 635.98	575.73	-1 535.07	182.28
	基本组合	335.29	-249.16	653.51	-370.18	-3 322.27	643.39	-3 874.58	220.52
竖向支撑	恒载	24.75	-25.26	43.83	-43.61	-155.73	-86.94	-193.80	-133.21
	车道荷载	94.86	-91.81	167.80	-167.80	-584.55	124.28	-561.75	117.08
	基本组合	126.51	-119.71	211.64	-211.41	-740.28	169.01	-793.29	46.10
横向联系 下横梁	恒载	0.71	-1.48	0.60	-1.17	0	19.88	0	17.17
	车道荷载	46.06	-42.20	42.77	-37.08	0	216.59	-29.41	185.96
	基本组合	46.67	-43.72	43.20	-38.39	-588.00	236.38	-588.00	204.06
横向联系 剪刀支撑	恒载	0.18	-0.39	0.16	-0.36	-30.72	-18.07	-27.95	-13.56
	车道荷载	15.01	-11.74	13.66	-11.07	-246.64	160.02	-207.20	142.54
	基本组合	15.16	-11.75	13.76	-11.11	-275.13	151.26	-232.55	139.26
斜向支撑	恒载	54.58	-53.77	55.41	-56.08	-59.35	175.71	-66.28	209.32
	车道荷载	129.55	-129.86	100.14	-99.06	-277.16	692.60	-401.58	616.53
	基本组合	182.41	-183.62	154.62	-155.14	-326.77	866.89	-436.97	824.60

注：表中轴力拉为正值，受压为负值。

后主拱截面在恒载作用下全截面受压，横向联系下横梁、剪刀撑、斜向支撑等构件受拉力均略有减小，受压略有增加，能更好发挥混凝土材料的性能^[12-15]。

根据《公路桥梁承载能力检测评定规程》(JTG/T J21—2011)，钢筋混凝土拱桥承载力计算公式如下：

$$\gamma_0 S = R(f_d, \xi_c a_{dc}, \xi_s a_{ds}) Z_1 (1 - \xi_e) \tag{1}$$

式中： γ_0 为结构的重要性系数； S 为荷载效应函数，N； $R(\cdot)$ 为抗力效应函数，N； f_d 为材料强度设计值，MPa； a_{dc} 为构件混凝土几何参数值，mm； a_{ds} 为构件钢筋几何参数值，mm； Z_1 为承载力检算系数； ξ_e 为承载力恶化系数； ξ_c 为配筋混凝土结构的截面折减系数； ξ_s 为钢筋的截面折减系数。

根据《公路桥梁加固设计规范》(JTG/T J22—2008)正截面抗弯承载力计算公式如下。

$$\gamma_0 M_d = f_{cd1} b x (h_0 - \frac{x}{2}) + f'_{sd} A'_s (h_0 - a'_s) + E_{sp} \varepsilon_{sp} A_{sp} a_s \tag{2}$$

式中： M_d 为弯矩组合设计值 N·mm； f_{cd1} 为原混凝土抗压强度设计值，MPa； x 为混凝土受压区高度，mm； b 为原构件截面宽度，mm； h_0 原构件截

面有效高度，mm； f'_{sd} 为原构件普通钢筋抗压强度设计值，MPa； A'_s 为原构件受压区纵向普通钢筋的截面面积，mm²； E_{sp} 为加固钢板的弹性模量，MPa； ε_{sp} 为构件达到承载能力极限状态时，加固钢板的拉应变； A_{sp} 为加固钢板的截面面积，mm²； a_s 、 a'_s 为受拉、受压区普通的钢筋合力点至受拉区边缘、受压区边缘的距离，mm。

受压承载力计算公式如下。

$$\gamma_0 N_d = f_{cd1} b x + f'_{sd} A'_s + f'_{sp} A'_{sp} - \sigma_s A_s - E_{sp} \varepsilon_{sp} A_{sp} \tag{3}$$

式中： N_d 为轴力组合设计值，N； f'_{sp} 为加固钢板的抗压强度设计值，MPa； A'_{sp} 为受压钢板的截面面积，mm²； σ_s 为受拉边或受压较小边纵向普通钢筋的应力，MPa； A_s 为受拉边或受压较小边普通钢筋的截面面积，mm²。

根据公式(1)~(3)及现状桥梁状况， ξ_e 配筋混凝土结构的截面折减系数取值0.94， ξ_s 钢筋的截面折减系数取值0.92， Z_1 承载力检算系数取值0.9， ξ_c 承载力恶化系数取值0.05。据此验算桁架拱桥承载力，仅以主拱肋和斜向支撑为例，进行验算，加固前后构件弯矩及轴力承载力验算结果如表3、4所示。

表 3 加固前后构件弯矩内力及抗力 kN·m

构件名称	位置	加固前		加固后	
		弯矩内力	抗力	弯矩内力	抗力
主拱肋	跨中截面	335. 29	197. 19	653. 51	864. 53
	1/4 截面	- 249. 16	197. 19	- 370. 18	864. 53
斜向支撑	第 8 道斜撑	182. 41	57. 13	154. 62	178. 24
	第 8 道斜撑	- 183. 62	57. 13	- 155. 14	178. 24
竖向支撑	第 3 道竖撑	126. 51	104. 33	211. 64	363. 53
	第 3 道竖撑	- 119. 71	104. 33	- 211. 41	363. 53

表 4 加固前后构件轴力内力及抗力 kN

构件名称	位置	加固前		加固后	
		轴力内力	抗力	轴力内力	抗力
主拱肋	拱脚截面	- 3 322. 27	- 4 018. 15	- 3 874. 58	- 5 198. 67
	拱顶截面	643. 39	457. 26	220. 52	1 753. 26
斜向支撑	第 4 道斜撑	- 327. 77	- 1 179. 85	- 436. 97	- 2 652. 57
	第 3 道斜撑	866. 89	342. 95	824. 60	1 333. 49
竖向支撑	第 2 道竖撑	- 740. 28	- 1 970. 34	- 793. 29	- 3 725. 62
	第 1 道竖撑	169. 01	393. 11	46. 10	1 512. 37

由表 3、4 可知，加固前拱桥主拱肋、斜向支撑及竖向支撑部分截面内力大于抗力，正截面抗弯承载能力和轴向受力不满足安全要求，无法满足功能需求，加固后桁架拱桥主拱肋、斜向支撑、竖向支撑等结构的内力均小于抗力，且富余量较大，承载力满足规范要求，加固后的钢筋混凝土桁架拱桥可继续正常使用，满足通行功能要求。

4 拱脚裂缝分析

竖杆、斜拉杆、横向联系等多根杆件交汇于桁架拱桥的节点位置，该处受力复杂。同时，本桥为预制拼装结构，但节点位置采用的现场浇筑方式连接。现场作业条件较差，施工质量难以保证，无法有效结合成一个整体从而共同受力。拱脚更是承受整座桥梁的水平推力，由于超静定结构对不均匀沉降非常敏感，桥台的不均匀沉降会引起拱桥部位产生较大的拉力，因此需要对拱脚进行重点分析。

4.1 拱脚局部分析加固模型

根据桁架拱桥的结构形式、受力分析及病害情况，选取损伤严重且受力复杂的拱脚节点作为

加固分析节点，采用 Midas FEA 有限元软件建立拱脚局部精细化分析的实体模型，混凝土标号为 C40，将全桥模型中提取的反力加载到拱脚节点，拱脚节点模型划分单元尺寸控制为 50 mm，总共 10 856 个节点，9 370 个单元。

拱脚的加固方式采用外包混凝土钢板的增大截面法：现状构件外侧包裹钢板，同时钢板与构件间 20 mm 的空隙浇筑微膨胀自密实低收缩的高性能混凝土，钢板兼作混凝土的模板，钢板选用 Q355C 钢材，厚度 6 mm，横向联系的斜杆及横杆采用黏贴钢板的加固方式，加固钢板厚度 6 mm。拱脚节点加固有限元模型如图 5 所示。

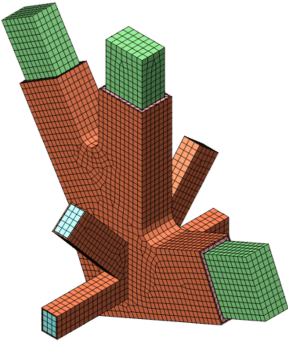


图 5 拱脚节点加固有限元模型

4.2 加固效果评价

4.2.1 应力评价

加固前后拱脚节点主应力云图如图 6 ~ 图 7 所示。

由图 6 和图 7 可知: 加固前拱脚混凝土主应力达到 36.5 MPa, 超过 C40 混凝土的抗压强度标准值 26.8 MPa, 不满足规范要求; 加固后原结构混凝土的应力减小到 24.4 MPa, 减小了 26.2%, 加固混凝土的主应力为 20.1 MPa, 加固钢板的主应力 126.3 MPa, 剪应力 51.9 MPa, 加固后拱脚位置的应力均能满足规范要求。

4.2.2 裂缝评价

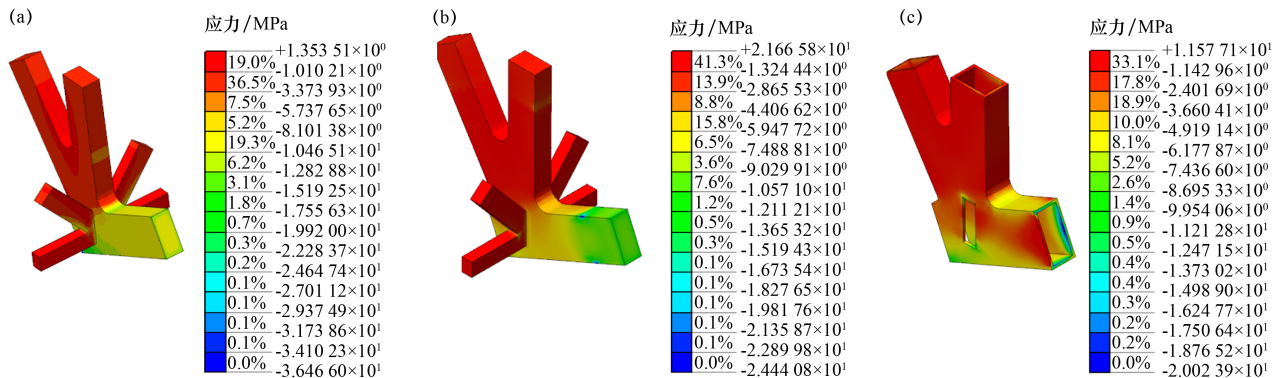
加固前后拱脚节点裂缝分布、裂缝宽度等特征参数如图 8、9 所示。

由图 8、9 可知: 加固前, 拱脚裂缝范围主要位于横向联系斜杆与主拱肋, 主拱与基础连接位置等, 与现状桥梁裂缝分布情况大致相同, 表明该模型可信; 加固前裂缝分布范围广、裂缝开展严重, 加固后裂缝的分布范围明显减小; 加固前, 拱脚节

点混凝土拉应力达到 1.65 MPa 的占比达到 77.3%, 加固后, 拉应力达到开裂应力的仅占 61.1%, 减小了 16.2%; 加固前开裂位置最大裂缝宽度达到 1.03 mm, 远远超过规范的限值 0.2 mm, 加固后拱脚节点最大裂缝宽度仅为 0.064 mm, 加固后拱脚裂缝得到有效抑制, 裂缝宽度减小后满足规范要求, 表明加固效果良好。

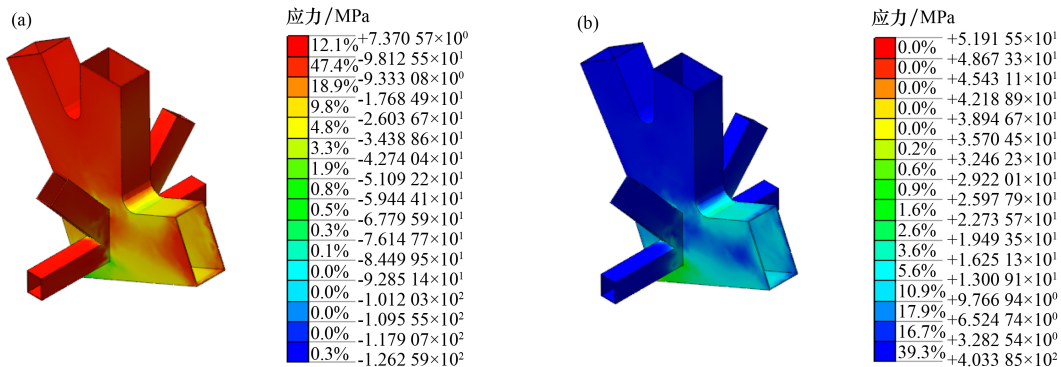
4.3 经济性评价

拆除重建现状病害的桁架拱桥, 将耗费大量的人力、物力及财力, 施工工期长, 对周边居民出行、生活及生产影响较大。然对现状桁架拱桥进行加固处理, 能最大程度保留现状结构, 成本较低, 施工工期较短, 对周边居民影响较小。钢板表面需进行打磨, 内部采用结构胶或微膨胀混凝土与原结构结合, 浇筑密实, 避免空隙; 钢板外侧采用防护涂层设计, 底涂层采用环氧富锌底漆, 最低干膜厚度为 80 μm , 一道; 中间涂层为环氧(云铁)漆, 最低干膜厚度为 190 μm , 两道; 面涂层为氟碳面漆, 最低干膜厚度 70 μm , 两道;



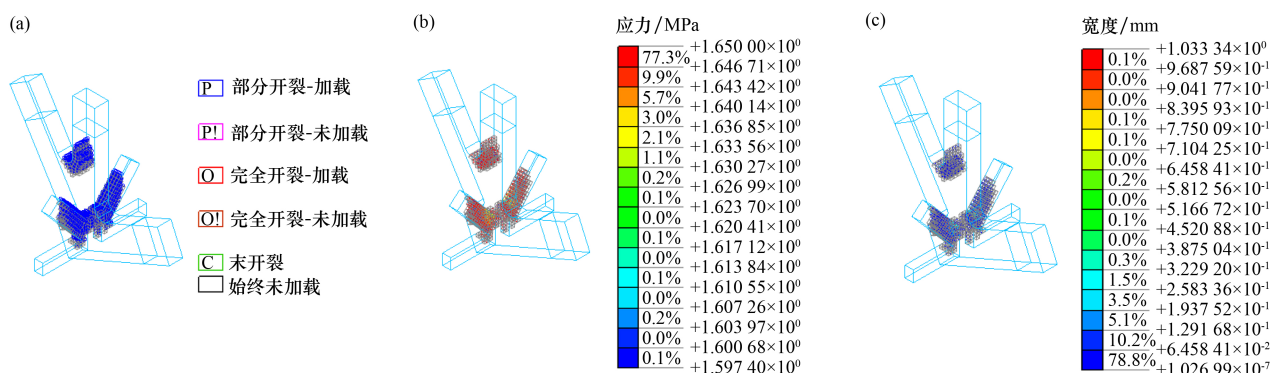
(a) 加固前混凝土主应力; (b) 加固后混凝土主应力; (c) 加固混凝土主应力

图 6 加固前、后拱脚节点混凝土主应力云图



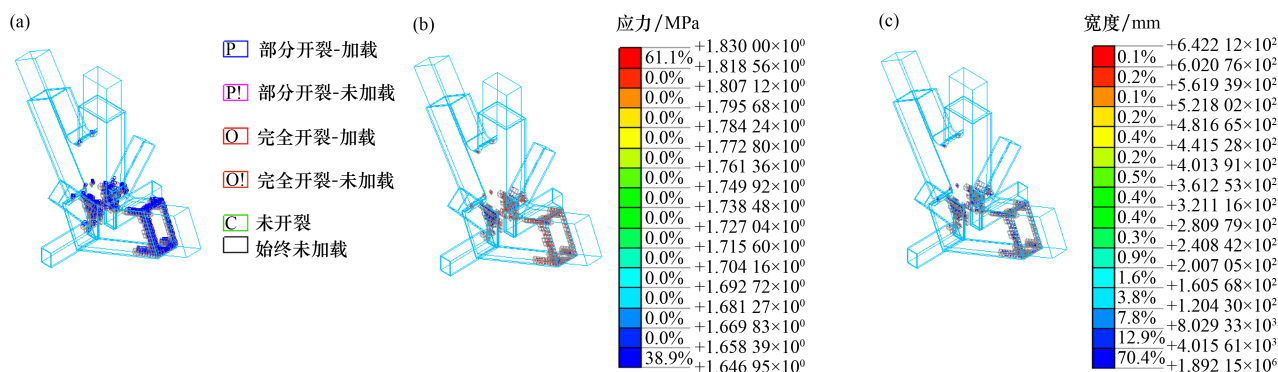
(a) 主应力; (b) 剪应力

图 7 加固后拱脚节点钢板应力云图



(a) 拱脚裂缝分布；(b) 拱脚裂缝应力；(c) 拱脚裂缝宽度。

图 8 加固前拱脚裂缝特征参数



(a) 拱脚裂缝分布；(b) 拱脚裂缝应力；(c) 拱脚裂缝宽度。

图 9 加固后拱脚裂缝特征参数

以提高钢板耐久性。为保证加固后桁架拱桥的安全性及可靠性，管养单位应根据相关要求对桥梁进行定期检查和养护，设置限重和限高标志，以便能更好发挥桁架拱桥的交通运输价值。

5 结 论

采用外包钢板并浇筑微膨胀自密实低收缩混凝土的方法加固主拱，采用黏贴钢板的方法加固横向联系，通过对桁架拱桥全桥及拱脚局部有限元分析，得到结论如下。

(1) 加固结构与原结构共同受力，加固后桁架拱桥的主拱、斜撑、横向联系等都构件的内力均小于抗力，且富余量较大，承载力满足安全要求，加固后的桥梁可继续正常使用。

(2) 加固后，拱脚节点的应力得到明显改善，应力满足规范要求。

(3) 加固后，拱脚节点的裂缝分布范围和裂缝宽度明显减小，加固效果良好。

(4) 采用合适的加固方式能节省投资、节约

施工工期，降低对周边居民影响，能更好发挥现状桁架拱桥交通运输价值。

参考文献：

- [1] 魏洋,纪军,端茂军,等. 钢筋混凝土斜杆桁架拱桥加固技术优化研究[J]. 公路,2015,60(5):50-55.
- [2] 何珂. 连续刚构桥跨中下挠的碳纤维内置桁架拱加固技术研究[D]. 西安:长安大学,2024.
- [3] 白朋波. 结构动力性能与桁架拱的加固设计[J]. 建筑技术开发,2021,48(22):10-13.
- [4] 张勇,李振宝,赵国梁,等. 河北宁晋体育馆结构设计及拱脚节点试验研究[J]. 建筑结构,2024,54(21):91-100.
- [5] 罗钧,谢传喜,王耀伟. 基于有限元模型的混凝土结构裂缝成因分析新方法[J]. 建筑结构,2019,49(23):134-138.
- [6] 丁鹏,周建庭,杨俊,等. UHPC 套箍加固肋拱桥承载力研究[J]. 中外公路,2019,39(4):119-123.
- [7] 陈磊,丁鹏,周建庭,等. 基于 UHPC 套箍与预应力相结合的肋拱桥加固技术研究[J]. 混凝土,2019(12):

- 173 – 176.
- [8] 戴许海, 马安财. 基于荷载试验的既有大跨径桁架拱桥加固后承载能力评定[J]. 工程建设与设计, 2023(14): 39 – 41.
- [9] MUSHTHOFA M, AMINULLAH A, Muslikh. Cross section and geometry optimization of steel truss arch bridges based on internal forces [J]. MATEC Web of Conferences, 2019, 258: 65 – 69.
- [10] 黄珍玉. 钢筋混凝土结构加固方法分析[J]. 工程建设, 2023, 55(1): 43 – 47.
- [11] 刘子源. 某在役钢筋混凝土桁架拱桥加固技术及应用研究[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [12] 宋洪雨, 苏春杰, 蔡保硕, 等. 混凝土桁架拱桥荷载试验与承载力评价[J]. 特种结构, 2024, 41(2): 51 – 57; 64.
- [13] NIERO L, PIAZZON R, ZAMPIERI P, et al. Post-tensioning system as a strengthening solution for masonry arch bridges: numerical and experimental results[J]. Procedia Structural Integrity, 2024, 62: 454 – 459.
- [14] 王勤征, 张华刚, 陈红鸟, 等. 钢筋混凝土桁架拱桥承载力加固的力学性能对比分析[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2021, 38(5): 74 – 80.
- [15] 王利辉, 张兴, 李振宝, 等. 钢管桁架拱 – 混凝土框架柱连接节点受力性能试验设计[J]. 结构工程师, 2023, 39(3): 117 – 125.

《工程建设》期刊投稿系统启用通告

为适应期刊发展需要, 提升投稿及稿件处理效率, 本刊自 2026 年 1 月 1 日起正式启用网上采编系统。即日起, 所有来稿请通过以下官方网站投稿与查询:

采编系统网址: <https://gcjs.cie-cn.com>

投稿流程说明:

1. 首次使用请先完成作者注册;
2. 注册成功后以作者身份登录;
3. 按系统页面提示完成投稿及相关操作。

请广大作者通过本系统进行投稿、查稿等事宜, 感谢您的支持与配合!